

JOÃO CARLOS MUNHOZ DAS NEVES

**AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE UM AQUECEDOR SOLAR
DE ÁGUA COM COLETOR DE TUBOS A VÁCUO NA CIDADE DE
CASCAVEL – PR**

CASCAVEL
PARANÁ - BRASIL
FEVEREIRO 2013

JOÃO CARLOS MUNHOZ DAS NEVES

**AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE UM AQUECEDOR SOLAR
DE ÁGUA COM COLETOR DE TUBOS A VÁCUO, NA CIDADE DE
CASCAVEL – PR**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira

Co-orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

CASCAVEL
PARANÁ - BRASIL
FEVEREIRO 2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

BIBLIOTECA CENTRAL DO CAMPUS DE CASCAVEL – UNIOESTE

Ficha catalográfica elaborada por Jeanine da Silva Barros CRB-9/1362

N424a Neves, João Carlos Munhoz das
Avaliação técnico-econômica de um aquecedor solar de água com coletor de tubos a vácuo na cidade de Cascavel-PR. / João Carlos Munhoz das Neves— Cascavel, PR: UNIOESTE, 2012.
41 p.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.
Bibliografia.

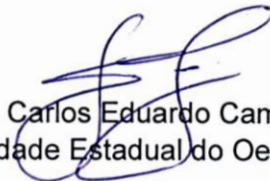
1. Aquecimento solar de água. 2. Energia renovável – Coletor solar a vácuo. I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

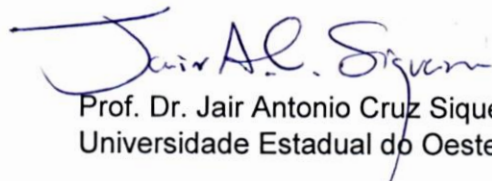
CDD 21.ed. 628.74


JOÃO CARLOS MUNHOZ DAS NEVES

“Avaliação técnico-econômica de um aquecedor solar de água com coletor de tubos a vácuo, na cidade de Cascavel – PR”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, **aprovado** pela seguinte Banca Examinadora:

Orientador:  Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel

 Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel

 Prof. Dr. José Airton Azevedo dos Santos
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/Medianeira

Cascavel, 20 de fevereiro de 2013.

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais,
João e Cenira.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço todo o amor e compreensão da minha esposa Mara, bem como o incentivo dos meus filhos Rafael, Pedro e Patrícia, meus maiores amigos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Eduardo Nogueira, que não só abriu as portas para esta minha caminhada, mas cuja dedicação e paciência (muita) foram fundamentais para concluí-la.

Ao Professor Samuel Nelson Melegari pela co-orientação e ajuda. Ao Professor Jair Antônio Cruz Siqueira pelo apoio, bem como a todos os professores que contribuíram para o meu crescimento.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura pelo apoio e infra-estrutura.

A todos os colegas de turma pelo incentivo, especialmente aos companheiros Mauricio Medeiros, Luis Ignácio e Cleber Bezerra.

E acima de tudo, agradeço à Deus, que torna realidade os nossos sonhos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama típico de um sistema de aquecimento solar direto, com circulação por termossifão.....	6
Figura 2: Seção típica de um coletor solar de superfície plana	7
Figura 3: Corte do tubo coletor a vácuo tipo <i>heat pipe</i>	8
Figura 4: Aquecedor solar de água com tubos a vácuo tipo <i>water-in-glass</i>	9
Figura 5: Corte do tubo coletor a vácuo tipo <i>U-tube</i>	10
Figura 6: Corte do tubo coletor a vácuo <i>filled type with U tube</i>	11
Figura 7: Corte do tubo coletor a vácuo <i>filled-type with double U-tube</i>	11
Figura 8: Processo de aquecimento de água com energia solar, num período de três dias.....	12
Figura 9: Variação diária do gradiente de temperaturas num reservatório térmico conectado a um coletor de placas.....	13
Figura 10: Alternativas de localização de fontes de energia auxiliar num tanque de aquecedor solar de água.....	14
Figura 11: Controle eletrônico da potência de um chuveiro elétrico.....	14
Figura 12: Curvas de rendimento para coletores solares de baixa e média temperatura.....	16
Figura 13: Coletor solar com tubos a vácuo tipo <i>all-glass</i> instalado na UNIOESTE, campus Cascavel.....	17
Figura 14: Corte do tubo coletor <i>all-glass</i>	17
Figura 15: Diagrama do reservatório térmico do aquecedor solar instalado na UNIOESTE – campus Cascavel.....	18
Figura 16: <i>Datalogger</i> CR 1000; conexões ao computador.	19
Figura 17: Termopar tipo J utilizado para as medições de temperatura.....	20
Figura 18: Localização dos pontos de instalação dos sensores de temperatura.	20
Figura 19: Sensores instalados para medição de temperatura da água.	21
Figura 20: Sensores instalados para medição da temperatura externa.	21
Figura 21: Piranômetro usado para medição da radiação solar.....	22
Figura 22: Transformador de corrente tipo janela.	23
Figura 23: Válvula de controle da saída de água para o consumo.....	23
Figura 24: <i>Timmer</i> e controle da resistência de aquecimento auxiliar.....	24

Figura 25: Diagrama elétrico da alimentação da resistência auxiliar e da válvula solenóide.....	25
Figura 26: Diagrama do misturador de água quente/fria proposto.	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparativo de consumo de energia elétrica entre os três cenários analisados	30
Tabela 2: Consumo diário de energia elétrica para aquecimento de água para banho a partir da entrada de água fria e da saída de água quente do boiler	32
Tabela 3: Determinação da economia usando água pré aquecida com energia solar para alimentar um chuveiro eletrônico	33
Tabela 4: Análise econômica de investimento em cinco opções para aquecimento de água para banho	35
Tabela 5: Dados de entrada da avaliação econômica de investimento.....	36

NEVES, João C. MSc, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Fevereiro de 2013. **Avaliação técnico-econômica de um aquecedor solar de água com coletor de tubos a vácuo na cidade de Cascavel** – Pr. Professor Orientador Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira.

RESUMO

A radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia para aquecimento da água em residências, serviços e indústrias. Como o potencial solar depende da radiação solar da região, neste trabalho foi avaliada a eficiência de um aquecedor solar com coletor de tubos a vácuo do tipo *all-glass* instalado na cidade de Cascavel, na região oeste do Paraná, obtendo-se o valor de 51% nos meses de inverno. Foi simulada a utilização da água quente para dois banhos diários no final da tarde para avaliar o consumo de energia elétrica do aquecimento auxiliar do aquecedor em três cenários. No primeiro e no segundo, o consumo foi avaliado em duas situações: ligando a resistência interna durante 24 horas do dia num cenário, e apenas no período da tarde em outro, sempre que a temperatura da água era inferior a 40 graus celsius. Estes resultados foram comparados com o consumo de um chuveiro elétrico de desempenho equivalente. No terceiro cenário, com a resistência auxiliar desativada, foi monitorado o diferencial de temperaturas entre a entrada e a saída de água do sistema. Estes dados, em conjunto com a radiação solar medida no local de pesquisa, foram usados para calcular a economia gerada pelo uso de um chuveiro eletrônico abastecido com água pré-aquecida pelo aquecedor solar. Concluiu-se que o chuveiro eletrônico usado de forma isolada consome anualmente cerca de 6,5 vezes mais energia elétrica do que quando usado em conjunto com aquecedor solar (1240,34 kWh e 192,55 kWh, respectivamente). Por último foi calculado o *payback* do investimento na compra de um aquecedor solar de água com tubos a vácuo tipo *all-glass*, comparado com o chuveiro eletrônico, obtendo-se em pouco mais de sete anos.

Palavras-chave: Energia renovável, coletor solar a vácuo, aquecimento solar de água.

NEVES, João C. MSc, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, February, 2013. **Technical-economic evaluation of a solar water heater with vacuum tube collector in the city of Cascavel** – Pr. Adviser Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira.

ABSTRACT

Solar radiation may be used directly as a source of energy for heating water for homes, services and industry. As the potential solar radiation depends on the region, this study evaluated a water-in-glass evacuated tube solar heater installed on Cascavel, in western Paraná, obtaining the value of 51% in winter months. Simulating the use of hot water in two daily baths in the late afternoon, three scenarios were established. In the first, with the auxiliary resistance off, it was monitored water differential temperature between inlet and outlet, together with the solar radiation measured at the research site, to evaluate the efficiency and energy balance of the heater. The energy consumption of auxiliary resistance was evaluated in other two scenarios: connecting for 24 hours a day, and only in the afternoon in another, whenever the water temperature fell below 40°C. These results were also compared with the consumption of an electronic shower of equivalent performance. It was analyzed the savings generated by the use of an electronic shower with water pre-heated by the solar heater. The electronic shower, functioning alone, consumes annually about 6.5 times more energy than when used together with solar heater (1240.34 kWh and 192.55 kWh, respectively). It was calculated the payback for the investment in the solar water heater with vacuum tube type all-glass, compared with the electronic shower, and it was obtained a little more than seven years.

Keywords: Renewable energy, evacuated tube solar heater, solar water heating.

SUMÁRIO

Biblioteca Central do Campus de Cascavel – Unioeste	iv
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos do trabalho	2
2. REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1. Energia para aquecimento de água	4
2.2. Incentivo governamental	4
2.3. A energia solar	5
2.4. Sistemas de aquecimento solar de água	5
2.5. Coletores solares planos.....	7
2.6. Coletores de tubos a vácuo.....	8
2.8. Reservatório de água quente	12
2.9 Sistema de aquecimento auxiliar	13
2.10 Chuveiros elétricos com potência variável eletronicamente.....	14
2.11 Desempenho dos coletores solares de água de uso residencial	15
3 MATERIAL E MÉTODOS	17
3.1. Equipamentos utilizados para medição e registro dos dados	19
3.1.1. Datalogger.....	19
3.1.2. Medição das temperaturas.....	19
3.1.3. Medição da radiação solar.	21
3.1.4. Medição do consumo de energia elétrica da resistência auxiliar. ...	22
3.2. Dispositivos de controle e sinalização.....	23
3.2.1. Controle da saída de água para o consumo.	23
3.2.2. Controle de funcionamento da resistência auxiliar	24
3.3. Diagrama de instalação	24
3.4. Metodologia.....	25
3.4.1. Consumo diário de água quente.	25
3.4.2. Cenários de utilização da resistência auxiliar	27
3.5. Tratamento dos dados	27
3.5.1. Cálculo da eficiência do aquecedor solar.....	27

3.5.2. Cálculo do balanço energético do sistema.....	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1. Eficiência do aquecedor solar analisado	30
4.2 Fator de Remoção do coletor (Fr) e Coeficiente Térmico do boiler (U)	30
4.3. Avaliação do funcionamento do aquecedor nos 90 dias do experimento.	30
4.4. Análise do uso do coletor solar como pré aquecedor para um chuveiro elétrico	31
4.5. Economia anual do uso conjunto do chuveiro eletrônico com aquecedor solar	33
4.6. Análise econômica de investimento em um sistema de aquecimento de água para banho.....	34
5. CONCLUSÕES.....	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38

1. INTRODUÇÃO

No ano de 2007, o consumo brasileiro de energia elétrica no setor residencial foi de 90.881 GWh, representando 22% do consumo total de energia elétrica no país (ANEEL, 2008). Considerando-se que o chuveiro elétrico represente 24% do consumo de uma residência, cerca de 18.000 GWh são destinados ao aquecimento de água para banho (PENNEREIRO, 2010).

Segundo Mogawer (2004), quase toda essa energia deve ser gerada em poucas horas do dia (basicamente entre 18h e 20h), sobrecarregando o sistema. Estima-se que o chuveiro elétrico contribui com 12,8% da demanda máxima do sistema elétrico brasileiro neste horário crítico, correspondendo a aproximadamente 6.800 MW de potência instalada, ou seja, quase metade dos atuais 14.000 MW de capacidade da Itaipu.

A possibilidade de substituir a eletricidade usada para este fim por outras fontes convencionais de energia, como os combustíveis fósseis, é descartada pela perspectiva de redução da sua oferta, aliada aos problemas ecológicos que seu uso acarreta. Resta o uso de fontes alternativas, surgindo a intensificação do uso da energia solar como solução natural para o nosso país, que tem um ótimo índice de radiação solar (ALDABÓ, 2002).

Este fato deveria contribuir para a intensificação do uso de aquecedores solares de água principalmente no sul do Brasil, onde é mais intenso o uso de chuveiros elétricos. Esta região possui os menores níveis de irradiação solar diária do país (4,20-6,70 kWh/m²), mas mesmo assim, bem superiores aos dos países da União Européia, como Alemanha (0,90-1,25 kWh/m²), França (0,9-1,65 kWh/m²) e Espanha (1,20-1,85 kWh/m²), países que utilizam muito mais intensamente esta tecnologia (PEREIRA *et al.* 2006).

Como exemplo da viabilidade desta aplicação, há uma planta de aquecimento de água por energia solar de 1MW, numa indústria de processamento de ovos na Índia. Com um coletor composto por 1280 placas planas, este sistema tem capacidade de produção diária de 110 000 litros de água a 85°C e sua implantação resultou na economia de 78% do óleo combustível consumido pela indústria, numa base anual (NAGARAJU, 1999).

O aproveitamento do enorme potencial de energia solar pode ser interpretado como uma intensa e constante geração virtual de energia elétrica, já que a

substituição dos aquecedores elétricos instantâneos (chuveiros elétricos) por coletores solares reduz o consumo e a participação deste tipo de carga no horário de pico de demanda das concessionárias de energia elétrica do país. (PRADO, 2007).

Contudo, um ponto negativo do aquecedor solar é o alto custo inicial. Além disto, soma-se o custo da energia elétrica consumida pelo seu sistema de aquecimento auxiliar, que pode ser superior ao de um chuveiro. A entrada recente no mercado brasileiro dos coletores solares com tubos a vácuo e boiler acoplado, pode vir a mudar este panorama, devido ao seu menor custo de aquisição aliado à menor necessidade do uso da resistência elétrica auxiliar. Este tipo de coletor é composto por uma série de tubos cada um com um absorvedor, o que faz com que os raios solares incidam perpendicularmente em suas superfícies durante quase todo o dia, aumentando a sua eficiência em relação aos coletores planos (GOERCK, 2008).

Com este trabalho pretende-se ampliar o conhecimento do desempenho de um aquecedor solar de água com tubos a vácuo instalado no oeste do Paraná, analisando inclusive alternativas de redução do custo adicional representado pela resistência de aquecimento auxiliar. Este conhecimento pode, inclusive, contribuir para intensificar o uso de aquecimento solar de água na agroindústria, com todos os benefícios daí decorrentes.

1.1.Objetivos do trabalho

O objetivo deste trabalho é avaliar um aquecedor solar de água com coletor de tubos a vácuo instalado na região oeste do Paraná para aquecimento de água de banho.

Os objetivos específicos foram:

- Calcular os parâmetros de eficiência do sistema de aquecimento solar avaliado, utilizando balanço energético;
- Calcular o consumo de energia elétrica do aquecedor com resistência auxiliar controlada apenas pela temperatura do *boiler* (cenário 1);
- Calcular o consumo de energia elétrica do aquecedor com funcionamento da resistência auxiliar limitada por um *timer* (cenário 2);

- Avaliar o aquecedor solar com a resistência auxiliar do boiler desligada (cenário 3);
 - Avaliar o aquecedor solar com a resistência auxiliar do boiler desligada, complementado por um chuveiro eletrônico de potência variável;
 - Calcular o *pay back* de investimento em um aquecedor solar comparado com um chuveiro eletrônico.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Energia para aquecimento de água

O chuveiro elétrico é a forma predominante de aquecimento de água no Brasil. Para Woelz (2002), a energia elétrica é identificada como sendo uma energia "nobre", com extensa gama de aplicações, que jamais deveria ser consumida para simples ações de aquecimento. Para tal fim, nosso país dispõe da alternativa energética solar, sendo privilegiado por níveis de insolação muito superiores aos de países da Europa, por exemplo, onde a energia solar é muito mais intensamente aproveitada do que aqui (PEREIRA, 2006).

2.2. Incentivo governamental

Segundo a ABRAVA (Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento), nosso país dispunha em 2011 de um montante acumulado de 7,3 milhões de metros quadrados de placas, ocupando oficialmente o sétimo lugar, logo atrás do Japão, no mais recente ranking mundial elaborado pela Agência Internacional de Energia (AIE). Em comparação, os Estados Unidos tinham 20,4 milhões de metros quadrados e a Alemanha, 12,6 milhões de metros quadrados, segundo e terceiro colocados, respectivamente. A líder China tinha 145 milhões de metros quadrados de coletores, cerca de 60% da base mundial instalada (ABRAVA, 2012).

O fato de países com insolação muito menor que o nosso terem maiores índices de aproveitamento de energia solar se deve a leis e incentivos governamentais, ainda recentes no caso do Brasil. Na cidade de São Paulo, a Lei 14.459, de 2007, torna obrigatório o uso de aquecedores solares em residências novas com mais de três banheiros e naquelas, sejam novas ou usadas, onde piscinas de água aquecida venham a ser construídas. Esta lei, também exige o uso energia solar para aquecer pelo menos 40% da água quente consumida nos estabelecimentos comerciais (NICHITA, 2007).

O Governo Federal, através do PAC 2 (Programa de Aceleração de Crescimento), também está incentivando o uso da energia solar. O programa prevê a instalação de aquecimento solar para o banho nos dois milhões de residências a

serem financiadas pelo programa "Minha Casa, Minha Vida", totalizando um investimento de R\$ 1,1 bilhão nos projetos de aquecimento solar (GOY, 2010).

2.3. A energia solar

Medições diretas da radiação solar fora da atmosfera da Terra em nove programas experimentais diferentes, utilizando aviões, balões e espaçonaves em altitudes muito altas, resultaram num valor de radiação denominada constante solar, G_{SC} , de 1353 W/ m^2 com um erro estimado de $\pm 1,5\%$. (DUFFIE E BACKMAN, 2006).

Já o conhecimento do potencial de energia solar disponível numa dada região é necessário para a estimativa da demanda máxima de evaporação, evapotranspiração e em artifícios de engenharia solar, como secadores, aquecedores, fogões solares, refrigeradores, etc. Isto compreende a medição do máximo possível de radiação solar incidente sobre a superfície do solo, para um determinado dia e local, estando a atmosfera presente e completamente isenta de nuvens durante todo o dia (PEREIRA, 2002).

Entre outros instrumentos, esta radiação solar incidente na superfície terrestre pode ser medida com um instrumento chamado piranômetro. Este instrumento tem o sensor localizado no plano horizontal, recebendo a radiação em todas as direções. As unidades mais usadas para estas medições são Wh/m^2 , Langley (Ly/dia) e cal/cm^2 . , sendo $1 \text{ Ly/dia} = 11,63 \text{ Wh/m}^2$. A intensidade média diária geralmente é indicada em MJ/m^2 (ALDABÓ, 2002).

2.4. Sistemas de aquecimento solar de água

Segundo Siqueira (2009), "um coletor solar é o principal componente de um sistema de aquecimento solar. Ele promove a conversão da radiação solar, transferindo o fluxo energético proveniente da radiação incidente para o fluido que circula no interior do mesmo".

Esta é a forma mais simples e direta de aproveitamento da energia solar. Durante o inverno, em Minas Gerais, um coletor composto por um simples tubo metálico preto fosco, com 6 metros de comprimento, é capaz de fornecer 70 kWh de energia por mês (RUAS, 2009).

Pela periodicidade da variação da radiação Solar, os coletores solares são conectados a reservatórios termicamente isolados para armazenagem da água por eles aquecida, comumente chamados *boilers* (INMETRO, 2008).

Existem dois tipos de circulação nos sistemas para aquecimento de água utilizando a energia solar: o ativo e o passivo. O sistema ativo utiliza uma bomba para a circulação do fluido entre o coletor e o reservatório térmico, necessitando de sensores e um sistema de controle para seu funcionamento. No outro sistema, chamado passivo ou de circulação natural, a bomba é eliminada, sendo o coletor instalado num nível mais baixo do que o tanque (Figura 1). A circulação se dá por termossifão, iniciando quando a água do coletor começa a ser aquecida e se torna menos densa do que a água fria do fundo do reservatório, que flui para a entrada do coletor. A água aquecida no coletor solar se desloca para a sua parte superior e daí para o topo do reservatório térmico (PENEREIRO, 2010).

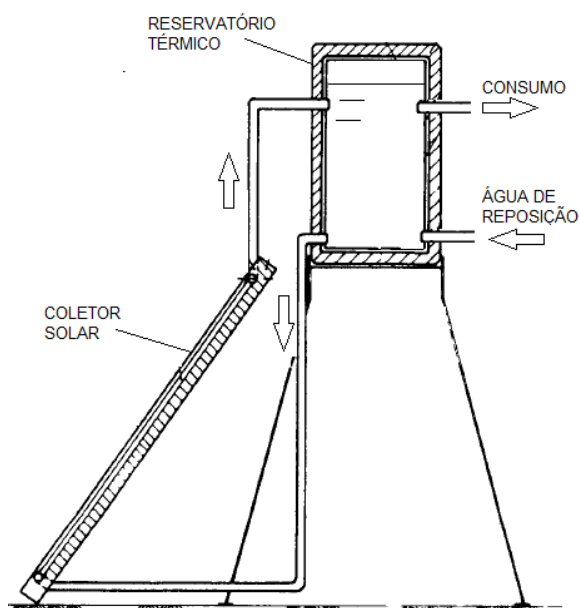


Figura 1: Diagrama típico de um sistema de aquecimento solar direto, com circulação por termossifão.

Para Siqueira (2003), tais sistemas, isentos de bomba e controles mecânicos, são os mais utilizados por serem simples e de menor custo de aquisição, principalmente para pequenos sistemas de uso doméstico.

Uma variante ainda mais simples deste aquecedor são os sistemas acoplados, nos quais os coletores solares e reservatórios térmicos que compõem o sistema são fabricados e fornecidos fisicamente unidos ou constituindo um corpo único (INMETRO, 2008). Assim são eliminadas as tubulações de interligação entre

ambos, o que reduz os custos de materiais e mão de obra de instalação, além das perdas térmicas.

Os sistemas descritos são chamados diretos, por ser a água o próprio fluido de trabalho. Nos países de clima frio, onde a ocorrência de congelamento nas tubulações é maior, a água nos coletores é substituída por fluidos refrigerantes, como etileno-glicol e propileno-glicol, além de óleos siliconados, óleos hidrocarbonados e outros refrigerantes, que circulam num circuito fechado. Nestes sistemas, chamados indiretos, são utilizados trocadores de calor localizados dentro ou fora dos reservatórios térmicos, onde a água para consumo é aquecida a partir do fluido de trabalho (PRADO, 2007).

2.5. Coletores solares planos

Os coletores solares planos fechados são utilizados para aquecer a água até uma temperatura de 60°C e proporcionar o condicionamento ambiental a partir da energia solar, com aplicação em residências, edifícios, hotéis, motéis, indústrias e hospitais (BAPTISTA, 2006).

Este tipo de coletor (Figura 2) é constituído por uma caixa de forma geométrica retangular, hermeticamente fechada e termicamente isolada por revestimentos de poliuretano expandido ou lã de vidro. Contém no seu interior uma chapa plana ou ondulada pintado de preto fosco, tendo como cobertura, uma lâmina de vidro plano ou plástico transparente. Internamente, a água circula por uma tubulação de cobre que, por ser um ótimo condutor de calor, transmite o calor absorvido do sol para a água.

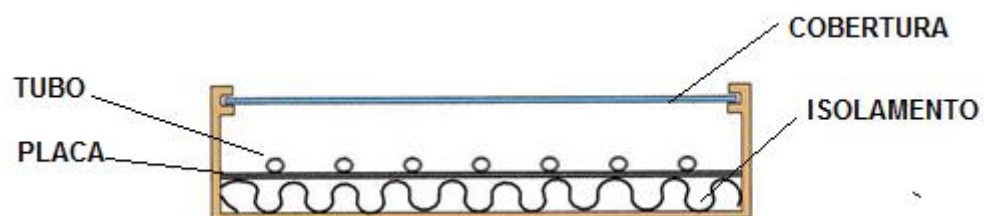


Figura 2: Seção típica de um coletor solar de superfície plana
Fonte: Prado, 2007.

A cobertura de vidro além de impedir a entrada de água de chuva, materiais sólidos, poeira, etc. no coletor, tem como finalidade principal provocar o efeito estufa.

Os coletores planos do tipo aberto, não tem esta cobertura, sendo usados principalmente para aquecimento de água de piscinas (SPRENGER, 2007).

2.6. Coletores de tubos a vácuo

Os aquecedores com coletores de tubos a vácuo são ainda pouco conhecidos no Brasil, porém são muito usados na China e Europa, por sua maior capacidade de permitir o aquecimento mesmo em dias nublados (radiação difusa), quando comparados com os coletores planos (GOERCK, 2008).

Nos coletores solares com tubos a vácuo tipo *fluid-in-metal*, o fluido a ser aquecido pela radiação solar circula em um tubo metálico inserido em um tubo de vidro, viabilizando a sua utilização em altas pressões e temperaturas. Entre eles, estão os tipos *heat-pipes* e *U-tube* (LIANG, 2011).

O coletor solar de tubo à vácuo com *heat-pipe* contém um tubo metálico como mostrado na Figura 3, devendo ser inclinado para funcionar eficazmente. Estes coletores geralmente usam o *heat pipe* para transmitir o calor para um tubo *manifold* externo, no topo do coletor, onde circula a água a ser aquecida. O *heat pipe* é selado, contendo um fluido facilmente evaporável que, quando aquecido pela radiação, evapora e sobe. Ao atingir o topo, troca calor com a água que circula no *manifold* e condensa, reiniciando o ciclo (NORTON, 2006).

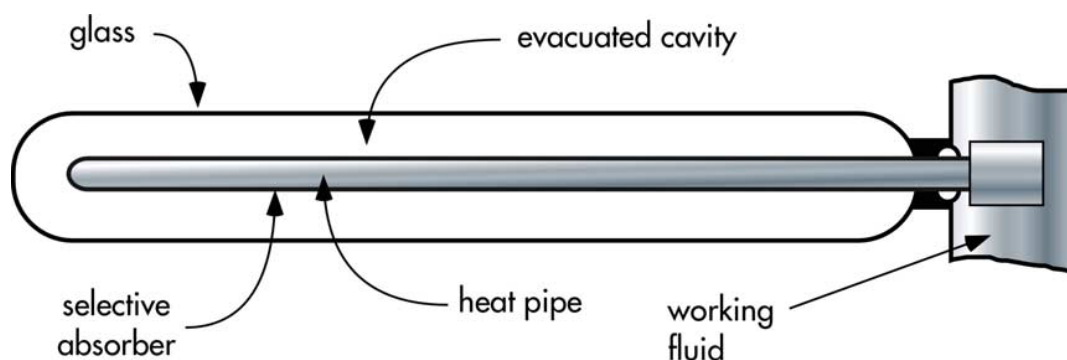


Figura 3: Corte do tubo coletor a vácuo tipo *heat pipe*.
Fonte: Norton, 2006.

Como o coletor tipo *heat-pipe* apresenta vantagens como anti-congelamento, rápido *start-up*, resistência às altas pressões, fácil instalação e manutenção, etc, vários países investem muito no seu aperfeiçoamento. Porém a sua grande deficiência na prática, é o desenvolvimento de um selo eficiente entre o vidro e o metal que mantenha o vácuo no decorrer do seu funcionamento. A falta disto leva à

formação de vapores não condensáveis no interior do tubo de vidro, o que reduz a sua vida útil (LIANDONG, 2010).

Um dos avanços mais significativos foi o desenvolvimento do coletor solar com de tubos evacuados tipo *all-glass* ou *water-in-glass* (Figura 4). O tubo evacuado consiste em dois tubos de vidro boro-silicato concêntricos, com suas extremidades inferiores fechadas. As bordas das pontas abertas dos tubos são seladas entre si e é feito vácuo no espaço anular entre os tubos. Uma bateria destes tubos – geralmente entre 15 e 40 tubos – é conectada diretamente a um reservatório térmico horizontal, com a água circulando neste sistema por termossifão (BUDIHardJO, 2009).

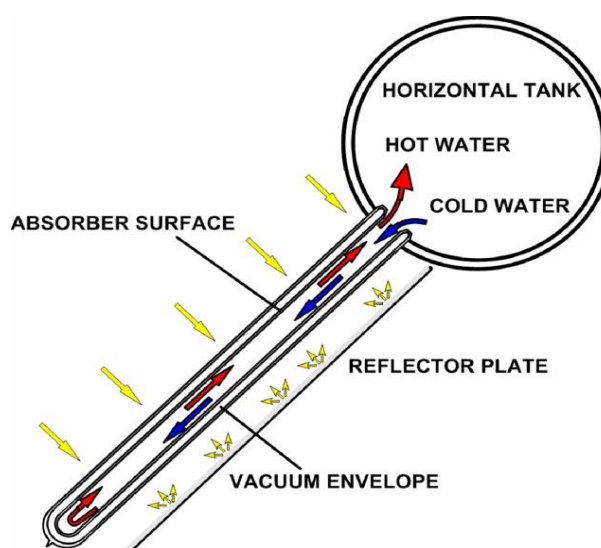


Figura 4: Aquecedor solar de água com tubos a vácuo tipo *water-in-glass*.
Fonte: Budihardjo, 2009.

A água tem contato direto com a superfície absorvedora de radiação solar, que é o tubo de vidro interno. A parte externa deste tubo é revestida externamente por três camadas que absorvem e convertem o máximo de radiação solar e luz infravermelha em calor, com reduzidas emissões para o meio externo:

1 - Uma camada de cobre metálico, que proporciona baixos níveis de emissões e altos níveis de transmissão térmica para o líquido refrigerante.

2 - Uma camada de aço inoxidável para evitar a migração cruzada. Isto permite estabilidade da camada de cobre em temperaturas superiores a 400° C.

3 - Uma terceira camada de nitreto de alumínio é aplicado simultaneamente na mistura de gás argônio e nitrogênio para produzir alta absorção da radiação solar ($\alpha=95\%$), com baixíssima emissividade resultante ($\varepsilon = 5\%$) (NEWHOME, 2012).

O vácuo existente entre as paredes dos tubos faz com que as suas perdas sejam reduzidas. Avaliando diversos tubos destes, *Budihardjo (2002)* obteve um coeficiente global de perdas térmicas (UA) entre $0,5-0,65 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$ para tubos de boa qualidade e entre $0,7-0,9 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$ para tubos de menor qualidade.

Embora o rendimento na captação de picos de radiação em um fluido de trabalho percorrendo diretamente um tubo absorvedor não seja tão elevada como a obtida por um *heat pipe*, a ineficiência adicional da troca de calor existente no cabeçote deste último é evitada. Os coletores a vácuo *all glass* dispensam também a vedação entre o vidro e o tubo metálico, o que simplifica a fabricação e elimina a vulnerabilidade operacional pela falha desta vedação (NORTON, 2006). Os requisitos de construção mais simples e menores custos de fabricação tornam o coletor solar *water-in-glass* a forma mais amplamente utilizada de colector de tubos evacuados. A limitação deste conceito é que ele só pode ser utilizado para um sistema de baixa pressão (BUDIHARDJO, 2002).

O coletor com tubo evacuado tipo *U tube* (Figura 5) surgiu como uma alternativa com capacidade de suportar altas pressões, mantendo uma estrutura mais simples, quando comparado com os tipos *all-glass* e *heat pipe*. O *U-tube* é um tubo em forma de U onde circula o fluido de trabalho. Este tubo é soldado a uma fina lâmina de cobre de formato cilíndrico, a qual é encaixada dentro do tubo absorvedor interno. Assim, o calor vindo de todas as direções para o tubo absorvedor é conduzido para o *U tube*. Atualmente este tipo de coletor é muito mais utilizado que o tipo *heat tube*. Porém o *gap* de ar existente entre a lâmina de cobre e a parede do tubo absorvedor cria uma resistência térmica a ser considerada neste ponto, reduzindo a eficiência deste tipo coletor (LIANGDONG, 2010).

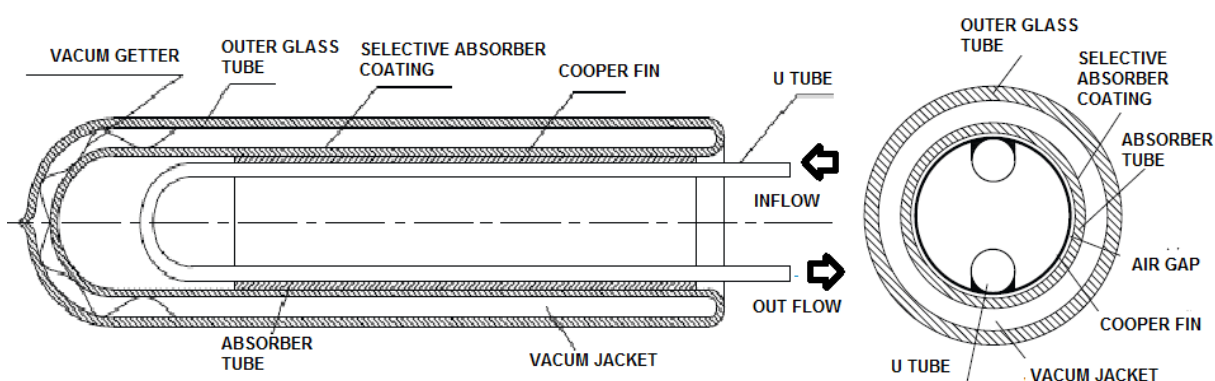


Figura 5: Corte do tubo coletor a vácuo tipo *U-tube*.
Fonte: Liang, 2011.

Para reduzir esta perda, desenvolveu-se uma variante deste tipo de coletor, o *filled type evacuated tube solar with U tube* (Figura 6). Nele, a lâmina de cobre é eliminada, sendo a condução térmica entre o tubo absorvedor e o *U tube* feita por um material de boa condutividade, como algum tipo de grafite, que preenche o espaço interno do tubo absorvedor. A eficiência avaliada deste coletor foi 12% maior que o anterior (LIANG, 2011).

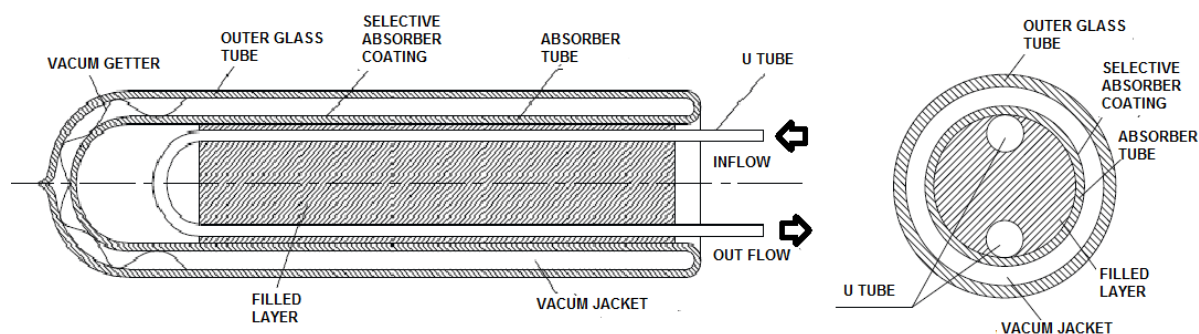


Figura 6: Corte do tubo coletor a vácuo *filled type with U tube*.
Fonte: Liang (2011).

Liang (2013) avaliou um tubo coletor evacuado com dois *U-tube* no seu interior (*filled-type with double U tube* ou *DUFET*), conforme a Figura 7, comprovando o seu desempenho superior pela maior área de transferência de calor.

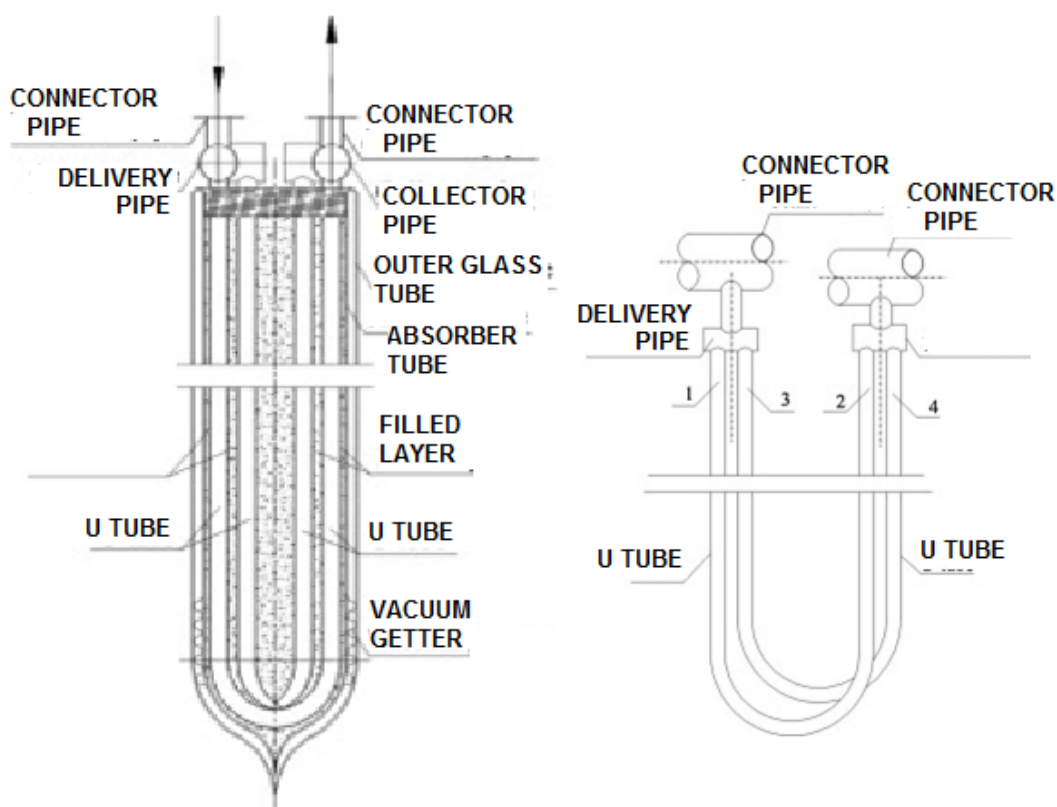


Figura 7: Corte do tubo coletor a vácuo *filled-type with double U-tube*.
Fonte: Liang, 2013.

2.8. Reservatório de água quente

A utilização da energia solar para o aquecimento de água implica num sistema de acumulação, pois deve atender à demanda de água aquecida quando não há insolação disponível, ou esta é insuficiente.

A Figura 8 (a) representa um processo de aquecimento com energia solar com reservatório térmico em função do tempo, para um período de três dias. Como durante uma parte do tempo, a energia disponível excede a demanda e em outras é menor, um subsistema de armazenamento é adicionado para armazenar o excesso de energia gerado pelo coletor e retorná-lo quando necessário. Na Figura. G_T é energia solar incidente, Q_u é o ganho útil do coletor e L a carga. Em (a), as áreas com hachuras verticais representam o excesso de energia a ser adicionado ao armazenamento e as com hachuras horizontais, a energia retirada do armazenamento para atender à carga. Áreas pontilhadas mostram a energia fornecida à carga. A Figura 8(b) mostra a reserva de energia que é adicionada ou removida do armazenamento, tendo tempo $t = 0$ como uma base em função do tempo (DUFFIE E BACKMAN, 2006).

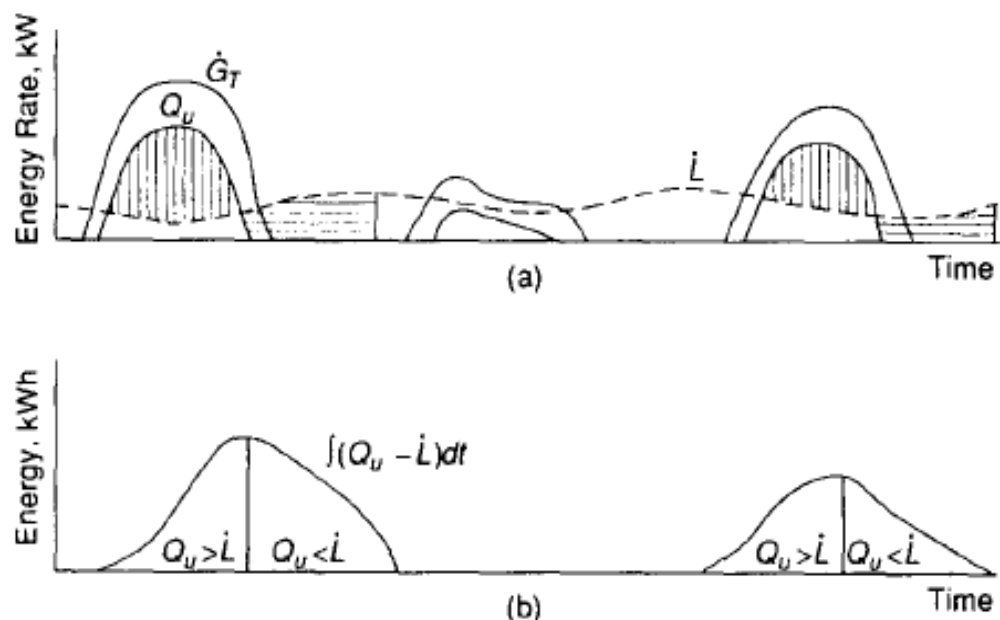


Figura 8: Processo de aquecimento de água com energia solar, num período de três dias.

Fonte: Duffie e Backmann, 2006).

Os reservatórios térmicos para sistemas de aquecimento solar distinguem-se pela temperatura elevada que a água pode alcançar no seu interior, sendo

fabricados preferencialmente de aço inoxidável, dotados de isolamento térmico visando a minimizar as perdas de calor para o meio ambiente (PRADO, 2007).

Budihardjo (2002) avaliou as perdas num reservatório acoplado a um coletor de tubos a vácuo do tipo *water-in-glass*, obtendo um coeficiente de $1,6 - 1,8 \text{ W.K}^{-1}$.

Segundo Duffie e Bachmann (2006), há um processo de estratificação da água dentro do reservatório, isto é, o seu topo é mais aquecido que a sua parte inferior. Shitzer (1978) avaliou um sistema de aquecimento solar de água por termossifão, sem consumo ao longo do dia, concluindo que não ocorre a homogeneização de temperaturas no reservatório térmico, assumindo que a estratificação é praticamente linear nesta condição (Figura 9). Nos sistemas de aquecimento solar de água por circulação natural, este grau de estratificação no reservatório é muito importante para a eficiência global do sistema. (SAVICKI, 2011).

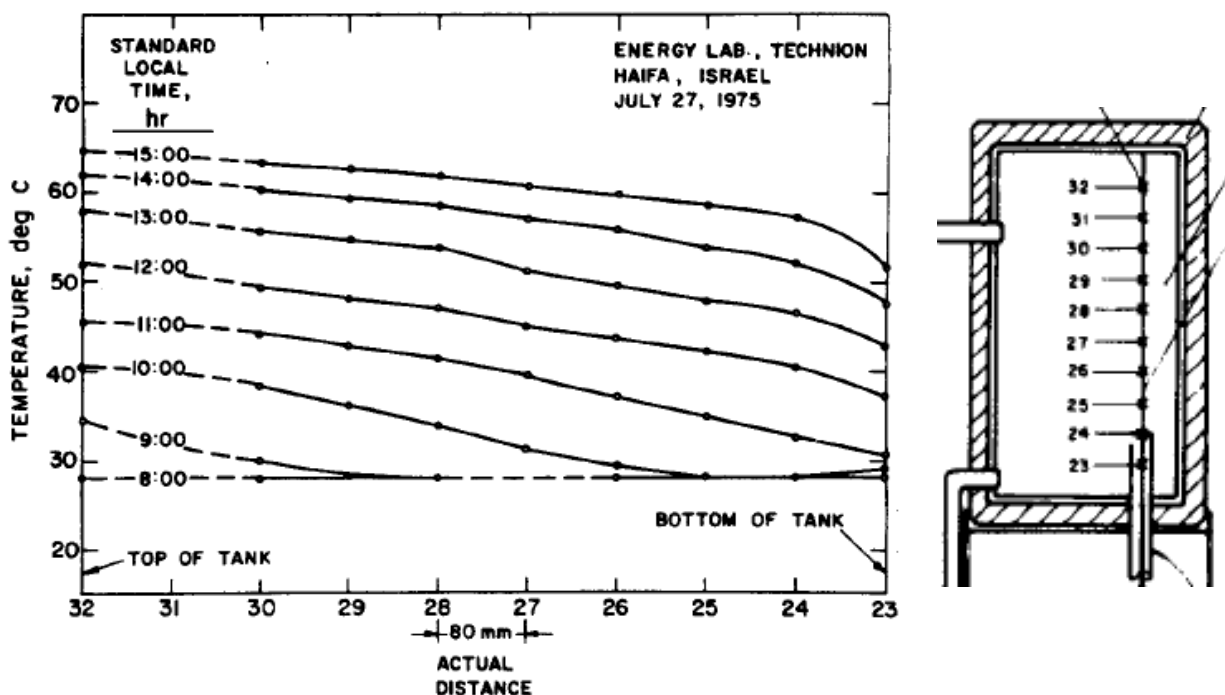


Figura 9: Variação diária do gradiente de temperaturas num reservatório térmico conectado a um coletor de placas.

Disposição dos pontos de medição no interior do tanque.

Fonte: Shitzer, 1978.

2.9 Sistema de aquecimento auxiliar

Mesmo contando com um reservatório térmico, os sistemas de aquecimento de água com energia solar não são projetados para fornecer 100% da demanda de água quente, pois neste caso, o coletor e o *boiler* deveriam ser superdimensionados para a pior situação possível, nos dias nublados e com baixas temperaturas. Ao

invés disto, prevê-se um sistema de aquecimento auxiliar, elétrico ou a gás, que complemente a energia necessária à demanda de água aquecida, apenas quando necessário (PRADO, 2007).

Este aquecimento auxiliar pode ser localizado interna ou externamente ao reservatório. Duffie e Backmann (2006) definem, conforme a Figura 10, quais as configurações mais utilizadas. A mais usual é a forma A, que consiste numa resistência elétrica dentro do tanque. A forma B, na linha de consumo e a aforma C, em *by-pass* com o reservatório, podem ser a gás ou eletricidade.

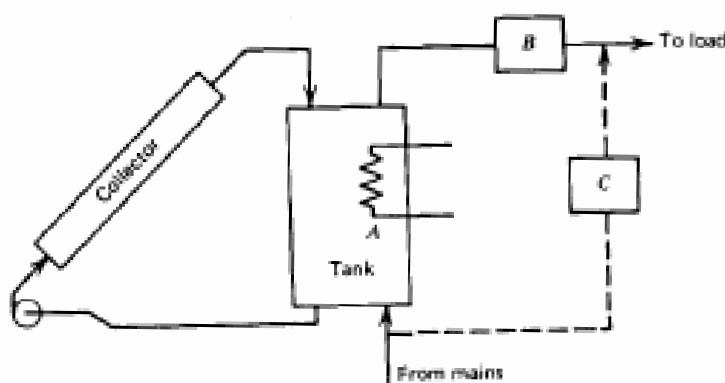


Figura 10: Alternativas de localização de fontes de energia auxiliar num tanque de aquecedor solar de água
Fonte: Duffie e Backmann, 2006.

2.10 Chuveiros elétricos com potência variável eletronicamente.

A Figura 11 ilustra o circuito elétrico de um chuveiro com a potência da sua resistência controlada por um semicondutor. O usuário ajusta a temperatura desejada atuando em um potenciômetro do circuito de controle do triac, variando o seu ângulo de disparo e, conseqüentemente, a corrente que circula na resistência (OLIVEIRA JUNIOR, 2006).

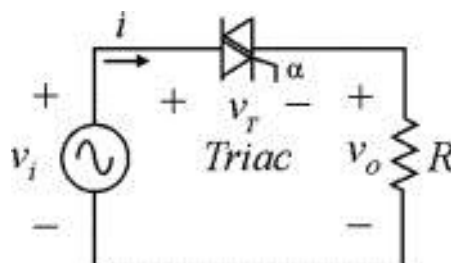


Figura 11: Controle eletrônico da potência de um chuveiro elétrico.
Fonte: Naspolini, 2010.

A utilização de sistemas de aquecimento solar permite a substituição total ou parcial de chuveiros elétricos. A solução total ocorre quando o sistema se vale de aquecimento elétrico complementar no reservatório. A solução parcial ocorre quando se utiliza um chuveiro com controle dinâmico de temperatura para complementar a energia térmica necessária à água (GIMENES, 2011).

Napolini (2012) demonstrou a economia do uso de chuveiros eletrônicos com água pré aquecida por aquecedores solares no sul do Brasil. Num experimento realizado em um conjunto de 90 residências na cidade de Florianópolis, foi obtida uma redução de 38% no consumo de energia elétrica e 42% na demanda de ponta nas 60 residências equipadas com coletores solares alimentando chuveiros eletrônicos, quando comparado às outras 30 que dispunham apenas de chuveiros eletrônicos.

2.11 Desempenho dos coletores solares de água de uso residencial

Segundo Redpath (2008), a eficiência anual de um coletor de placas bem dimensionado fica entre 35-40%, contra 45-50% dos coletores de tubo a vácuo. O mesmo avaliou um coletor de tubos evacuados de aquecimento indireto (*heat-pipe*) durante um ano em Ulster (UK), obtendo a eficiência média de 63,7%.

Apesar de apresentarem um desempenho muito bom para situações meteorológicas adversas, os coletores de tubos a vácuo têm menor eficiência de conversão da energia solar em térmica do que os coletores de placas em situações meteorológicas mais favoráveis (MANEA, 2011). Goerck (2008) avaliou um aquecedor solar de água com coletor de tubos a vácuo com *heat pipe* operando durante o inverno na região de Taquari (RS). A eficiência do coletor foi estimada em 43% no mês de junho, mas caiu para 37% no mês de agosto, com a melhora das condições de temperatura e radiação solar.

De um modo geral, não existe um tipo de coletor solar que seja o mais eficiente sob qualquer condição (Figura 12). Por exemplo, para uma aplicação com baixas temperaturas de trabalho numa região muito ensolarada, um coletor com absorvedor plástico pode ser uma ótima solução (NORTON, 2006).

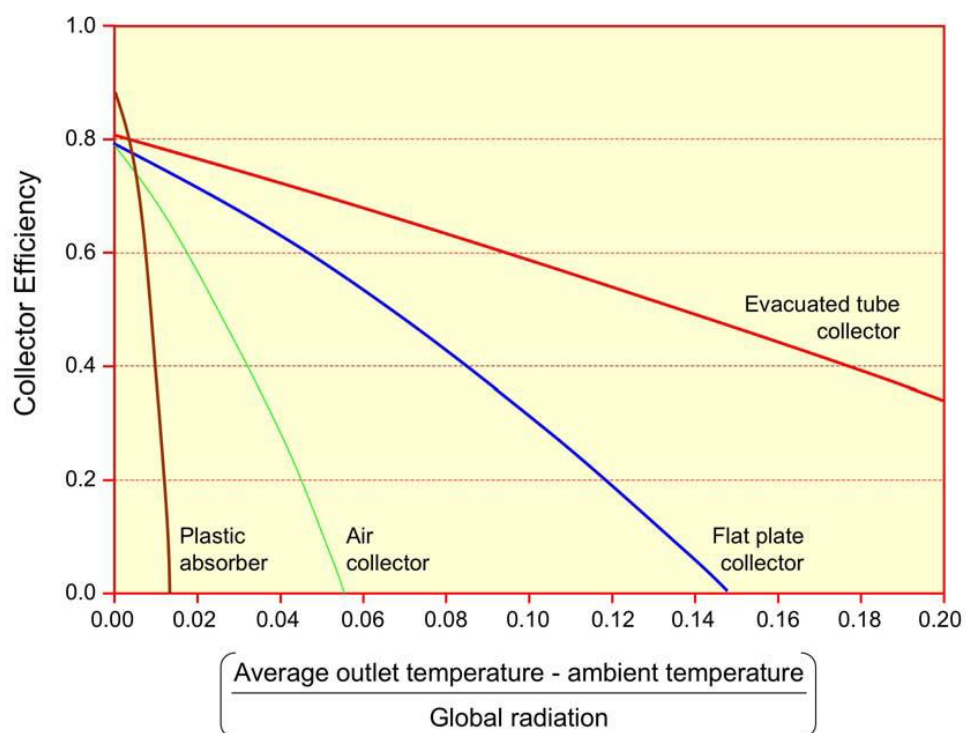


Figura 12: Curvas de rendimento para coletores solares de baixa e média temperatura.

Fonte: Norton, 2006.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Esse experimento foi realizado no período de 01 de junho a 31 de agosto de 2012, no Campus da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, na cidade de Cascavel, com Latitude 24°59' Sul, Longitude 58°23' Oeste e altitude média de 785 metros. Foi instalado um aquecedor de água com coletor de tubos a vácuo acoplado ao *boiler* (Figura 13) da marca EXXA, com dimensões de 1,60 x 2,60m. O coletor de tubos foi orientado para o norte, com inclinação de 28°. Esta inclinação já é definida pela configuração original da estrutura do equipamento e está dentro da tolerância da latitude $\pm 10^\circ$ especificada pelo fabricante.



Figura 13: Coletor solar com tubos a vácuo tipo *all-glass* instalado na UNIOESTE, campus Cascavel.

O coletor, do tipo *all-glass* é constituído por 20 tubos de vidro conforme a Figura 14, acoplados diretamente ao reservatório térmico

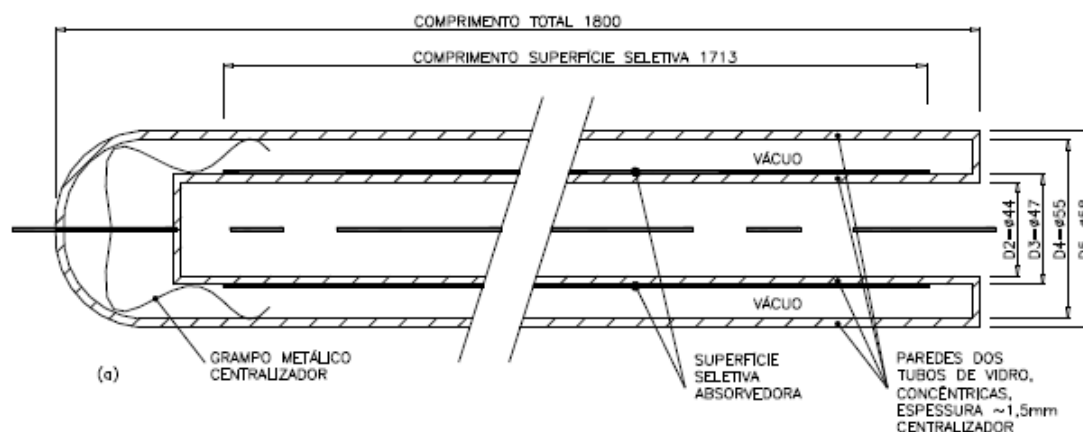


Figura 14: Corte do tubo coletor *all-glass*
Fonte: Manea, 2011.

O reservatório térmico, com 170 litros de capacidade, tem no seu interior uma resistência elétrica de 1500 watts. A alimentação de água fria do sistema foi feita diretamente da rede de distribuição do campus, através de tubulações de PVC. Por ser o coletor acoplado ao reservatório térmico, não são utilizadas tubulações para a circulação de água quente.

A entrada de água no sistema é feita por um tanque pequeno de reposição, dotado de bóia de nível, que está montado sobre o reservatório térmico. A água deste tanque é conduzida por um tubo interno, que desce até a parte inferior do *boiler* (Figura 15).

Já a água aquecida nos tubos de vidro do coletor sobe por convecção e dirige-se até a parte mais alta do reservatório térmico, de onde é conduzida para a saída através de outro tubo interno.

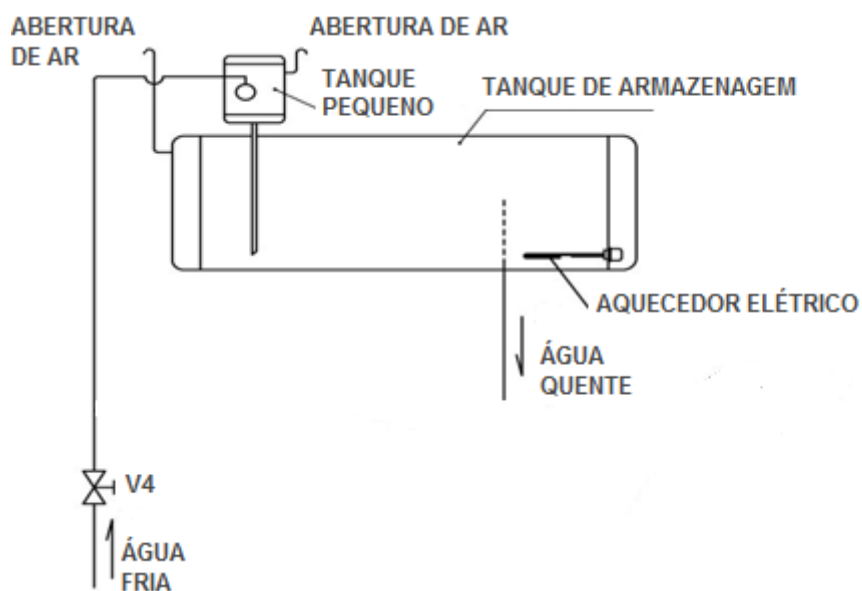


Figura 15: Diagrama do reservatório térmico do aquecedor solar instalado na UNIOESTE – campus Cascavel.
Fonte: EXXA Solar (2009).

O controle de saída de água quente foi feito por uma válvula solenoide instalada sob o boiler. Esta válvula tem dupla saída para obter maior vazão de água.

3.1. Equipamentos utilizados para medição e registro dos dados

3.1.1. Datalogger

Os dados de temperatura, radiação solar e corrente elétrica foram coletados a cada 10 segundos num registrador eletrônico de dados, que armazena as informações adquiridas em sua memória interna para, posteriormente, serem calculadas as médias horárias. O equipamento utilizado foi um *datalogger* modelo CR 1000 de fabricação Campbell Scientific, com oito entradas analógicas. Utilizando o programa *LoggerNet 3.4*, estes dados foram transferidos para um computador, através de uma porta de comunicação RS-232, para análise posterior. Além disto, foi utilizada uma saída programável de 12 VCC do *datalogger* para acionar o contator que energizava a resistência auxiliar de 1500W/220V, em função da temperatura interna do *boiler* (Figura 16).



Figura 16: *Datalogger* CR 1000; conexões ao computador.

3.1.2. Medição das temperaturas.

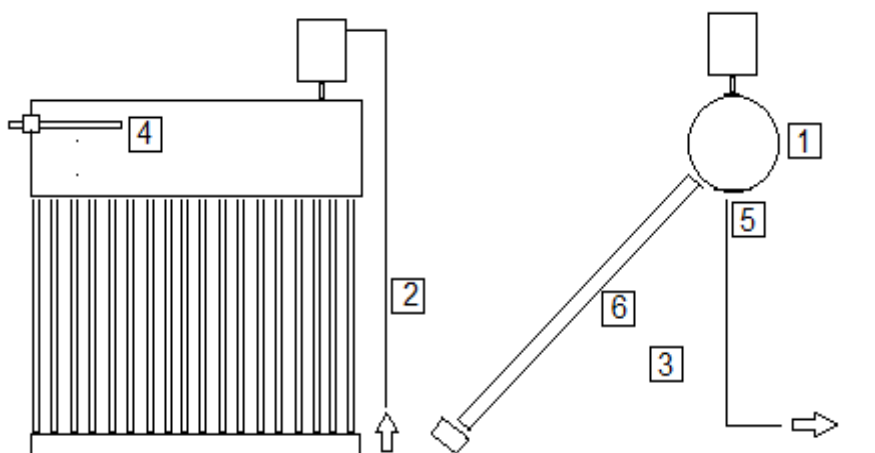
As temperaturas foram medidas utilizando-se seis termopares tipo J, interligados ao sistema de aquisição de dados (Figura 17). Os termopares do tipo J são sensores que atuam numa faixa de temperatura de 0 a 750°C, com resposta muito rápida e que têm um custo relativamente baixo. Os utilizados têm proteção metálica e isolamento mineral, permitindo a sua instalação em contato direto com a água.



Figura 17: Termopar tipo J utilizado para as medições de temperatura.

Para cada sensor, foi determinado um fator de correção através de comparação com um termômetro de vidro padrão, minimizando assim as discrepâncias decorrentes da tolerância de fabricação e da extensão dos cabos de conexão até o *datalogger*.

O diagrama da Figura 18 mostra localização dos sensores de temperatura no aquecedor.



- | | |
|------------------------------------|----------------------------------|
| 1 – Sensor externo do boiler | 4 – Sensor interno do boiler |
| 2 – Sensor de entrada água fria | 5 – Sensor de saída de água fria |
| 3 – Sensor de temperatura ambiente | 6 – Sensor externo do coletor |

Figura 18: Localização dos pontos de instalação dos sensores de temperatura.

As temperaturas de água no sistema foram monitoradas em três pontos: na tubulação de entrada de água fria, na saída de água quente e no interior do reservatório térmico, conforme Figura 19.



Figura 19: Sensores instalados para medição de temperatura da água. À esquerda, temperatura de entrada da água fria; ao centro, saída de água quente para consumo e à direita, temperatura interna do *boiler*.

As temperaturas externas foram monitoradas em três pontos: na face externa de um dos tubos de vidro do coletor, na superfície externa do reservatório térmico e também a temperatura ambiente, conforme Figura 20. Estes sensores foram instalados de forma a não receber a radiação direta do sol.

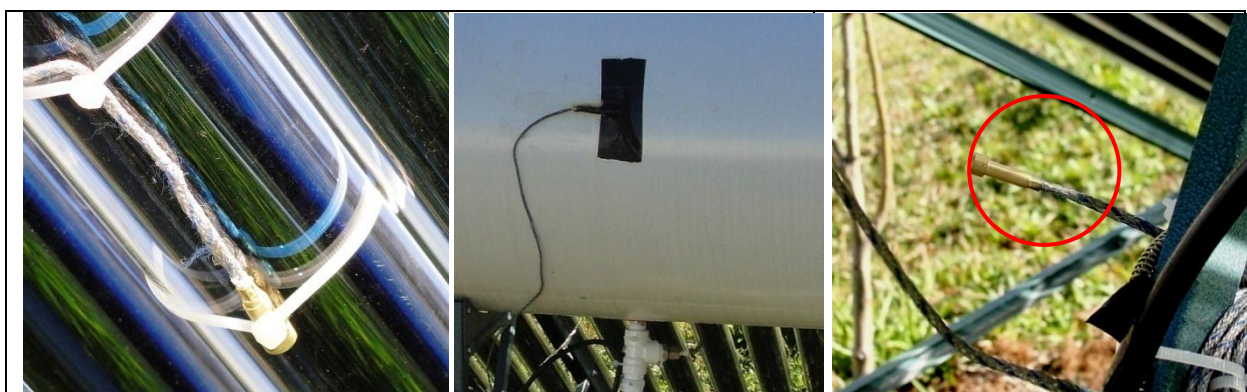


Figura 20: Sensores instalados para medição da temperatura externa. Os sensores estão localizados na face externa de um tubo do coletor (esq.), na parede externa do *boiler* (centro) e sob o aquecedor, para medição da temperatura ambiente (dir.).

3.1.3. Medição da radiação solar.

A medição da radiação solar no local da pesquisa foi feita por um piranômetro de fabricação Kipp & Zonen, modelo CMP3, com uma sensibilidade de 15,30 microvolts/watt.metro², indicado na Figura 21. Ele foi instalado próximo ao aquecedor, sendo que os valores de radiação medidos foram armazenados no *datalogger* de 10 em 10 segundos, para posterior comparação com os resultados da energia calorífica do sistema.



Figura 21: Piranômetro usado para medição da radiação solar.

Segundo o fabricante, a precisão deste instrumento é garantida com a sua instalação num plano perfeitamente horizontal. Como a superfície do coletor solar tem inclinação de 28°, os valores de radiação foram corrigidos pelo fator R_b , calculados pela Equação (01) (PRADO, 2007).

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \quad (01)$$

onde:

R_b = fator de inclinação;

θ = ângulo de incidência, igual ao ângulo de inclinação do coletor;

θ_z = ângulo zenital, entre direção da radiação direta medida e o zênite, igual a 0°.

3.1.4. Medição do consumo de energia elétrica da resistência auxiliar.

A energia elétrica consumida pela resistência de aquecimento do boiler é dada por:

$$E = \frac{V \times I \times t}{3600} \quad (02)$$

onde:

E = energia elétrica, em Wh

V = valor da tensão de alimentação, em V

I = valor de corrente registrado pelo datalogger, em A

t = tempo de funcionamento da resistência, em s

A corrente de alimentação da resistência foi monitorada por um transformador de corrente tipo janela. Este transformador possui um núcleo em forma de anel

(núcleo toroidal), com enrolamento secundário conectado a uma das entradas analógicas do *datalogger*. O enrolamento primário é o próprio condutor do circuito de alimentação da resistência, que passa por dentro da janela (Figura 22). O modelo utilizado foi o CS10-L de fabricação Campbell Scientific, com capacidade de até 200A e precisão de $\pm 5\%$.



Figura 22: Transformador de corrente tipo janela.

3.2. Dispositivos de controle e sinalização.

3.2.1. Controle da saída de água para o consumo.

A saída de água quente foi controlada por uma válvula solenoide dupla, modelo EVA-03 de fabricação EMICOL, comandada por um disjuntor à distância. Possui conexão de 3/4" e alimentação em 220 V (Figura 23).

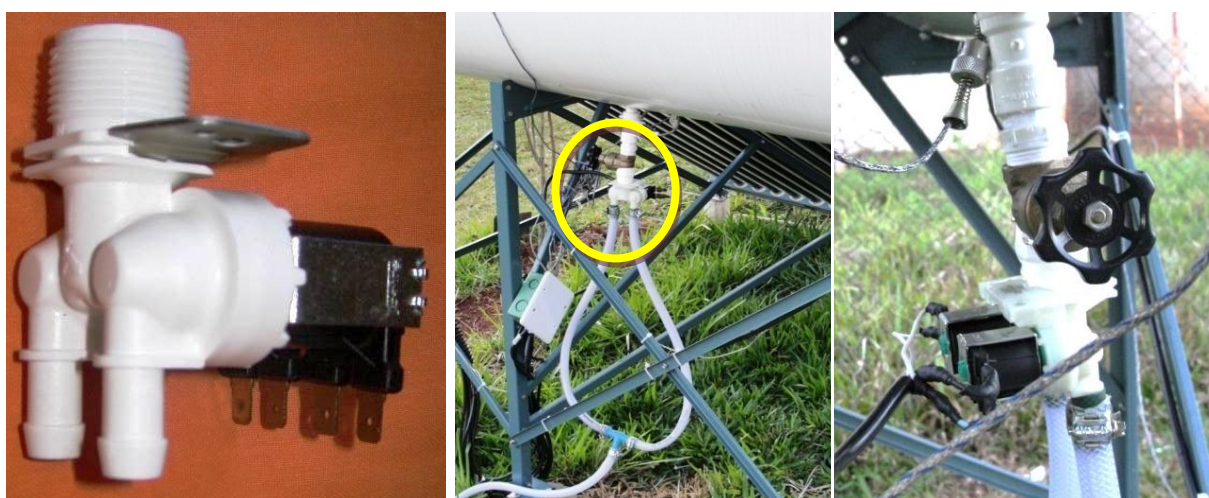


Figura 23: Válvula de controle da saída de água para o consumo.

3.2.2. Controle de funcionamento da resistência auxiliar

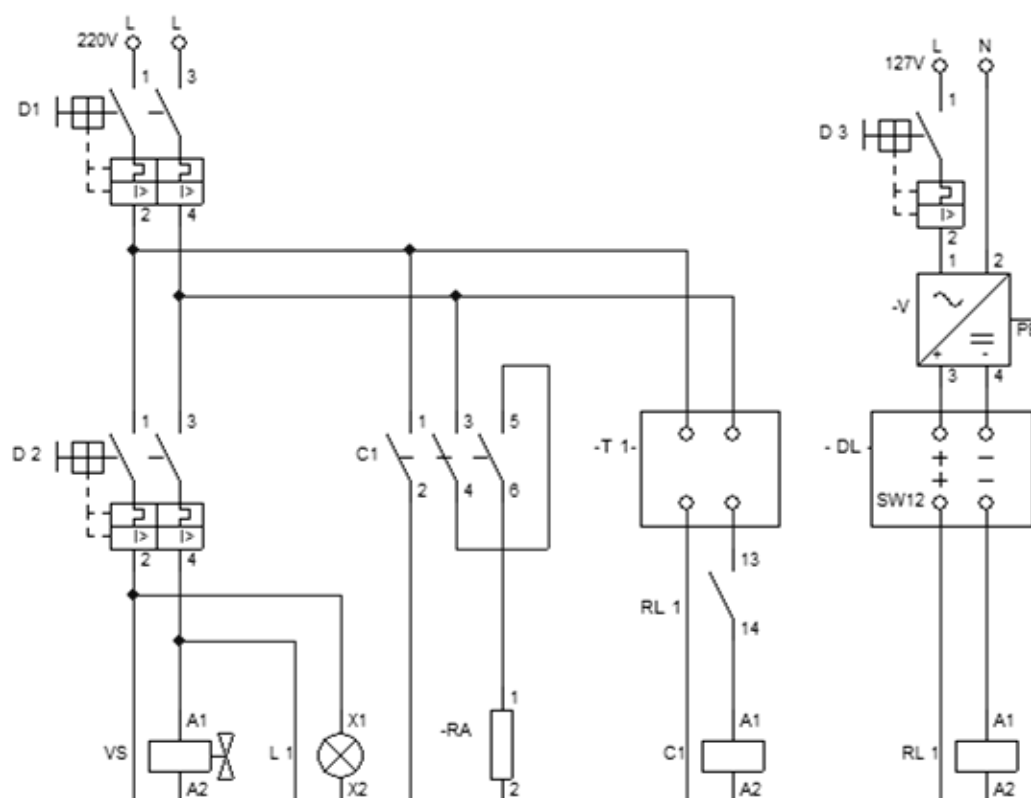
Para criar cenários diferentes em função do funcionamento da resistência elétrica auxiliar do boiler, foi instalado um *timer* modelo Lógica 600, de fabricação Kienzle. A configuração deste timer foi alterada diariamente, permitindo energizar a resistência elétrica em dias e horários determinados. A Figura 24 mostra o controle da resistência de aquecimento auxiliar, composto pelo timer, um relé e um contator, controlados pela saída de 12 volts do *datalogger*, bem como o transformador de corrente para monitorar o seu funcionamento. Também nesta figura aparece o disjuntor que aciona a válvula solenoide de saída de água quente e a lâmpada que sinaliza este acionamento.



Figura 24: *Timmer* e controle da resistência de aquecimento auxiliar.

3.3. Diagrama de instalação

A instalação elétrica para alimentação da resistência auxiliar e da válvula solenoide seguiu a norma NBR 5410/2004 – Instalações elétricas de baixa tensão (ABNT, 2004). Suas conexões elétricas estão indicadas na Figura 25.



D1, D2 – Disjuntores bipolares

D3 – Disjuntor monopolar

VS – Válvula solenóide

L1 – Lâmpada de sinalização

C1 – Contator tripolar

SW 12 – Saída 12 VCC controlada pela temperatura interna do boiler

RA – Resistência de aquecimento

T1 – Timer

RL 1 – Relé 12 VCC

V – Fonte de alimentação do datalogger

DL – Datalogger

Figura 25: Diagrama elétrico da alimentação da resistência auxiliar e da válvula solenóide.

3.4. Metodologia

3.4.1. Consumo diário de água quente.

O consumo diário de água quente durante todo o intervalo do experimento foi fixado em dois banhos diários, concentrados ao final da tarde, com temperatura da água em torno de 40°C e volume de 60 litros por banho.

Como as temperaturas de água quente e fria variam diariamente, seria necessário um misturador para atender esta exigência (Figura 26). Por questões práticas, optou-se por simular este misturador.



Figura 26: Diagrama do misturador de água quente/fria proposto.

A vazão de saída de água quente eliminada através da válvula solenóide foi medida, obtendo-se o valor constante de 6 L min^{-1} . Portanto, a partir da variação do tempo de acionamento desta válvula, foi possível obter o volume de água quente que seria necessário adicionar à água fria para obter uma mistura à temperatura de 40°C . Este tempo foi calculado com a Equação (03).

$$t = \frac{2400 - 60 T_f}{Q (T_q - T_f)} \quad (03)$$

onde:

t = tempo de abertura da válvula solenoide (min)

T_f = temperatura de água fria ($^\circ\text{C}$)

T_q = temperatura de água quente ($^\circ\text{C}$);

Q = vazão de saída de água quente ($6 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)

Os valores de temperatura de água quente e fria utilizados na equação eram obtidos diretamente das medições registradas no *data logger*, momentos antes de cada simulação.

Assim, ao final de cada tarde, era calculado o tempo de abertura da válvula solenoide e feitas duas descargas de água quente, simulando as condições desejadas para os banhos (60 L e 40°C).

3.4.2. Cenários de utilização da resistência auxiliar

O *datalogger* foi programado para ligar a resistência de aquecimento auxiliar do *boiler* quando sua temperatura fosse inferior a 40°C e desligá-la ao alcançar 45°C. Sempre respeitando esta programação, foram fixados três cenários para o sistema instalado:

Cenário I – Com o timer na posição “LIGADO”, a resistência auxiliar é ligada a qualquer hora do dia.

Cenário II – O timer configurado na posição “AUTOMÁTICO” permite energizar a resistência apenas à tarde, no horário entre 12:00 e 18:00 horas.

Cenário III – O timer na posição “DESLIGADO”: não permite energizar a resistência auxiliar.

Ao final da tarde de cada dia, a configuração do timer era mudada, de forma que estas três condições se alternaram durante todo o período do experimento. A intenção foi aproveitar as três formas de operação do aquecimento auxiliar em condições de temperatura e irradiação solar semelhantes, que geralmente ocorrem em dias consecutivos nesta época do ano.

3.5. Tratamento dos dados

3.5.1. Cálculo da eficiência do aquecedor solar

A eficiência do aquecedor solar com *boiler* acoplado foi determinada pela média das eficiências diárias, calculadas a partir de valores obtidos entre as 6:00 e 18:00 horas de cada dia.

Com os valores de temperatura na entrada de água fria e dentro do boiler foram calculadas as médias horárias para estes dos pontos. Estes valores médios, em conjunto com a massa de água do reservatório térmico, foram utilizados para determinar a energia térmica necessária à água para a alteração da sua temperatura, com a Equação 04 (DUFFIE E BECKMAN, 2006).

$$Q = m \times C_p \times (T_{\text{maior}} - T_{\text{menor}}) \quad (04)$$

onde:

Q = energia térmica (Wh);

m = massa de água do reservatório térmico (kg);

C_p = coeficiente térmico da água ($1,628 \text{ Wh} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$);

T_{maior} = temperatura máxima do reservatório no final do período ($^\circ\text{C}$);

T_{menor} = temperatura mínima do reservatório no início do período ($^\circ\text{C}$).

Os valores da radiação solar incidente no coletor e da energia elétrica consumida pela resistência auxiliar foram totalizados hora a hora, para serem convertidos no total de energia fornecida ao aquecedor. Assim, a eficiência do sistema foi calculada com a Equação (05):

$$\eta = \frac{Q}{A_c \times \Sigma S \times R_b + \Sigma Q_a} \times 100 \quad (05)$$

onde:

η = eficiência do sistema (%);

A_c = área do coletor solar ($1,61 \text{ m}^2$);

S = radiação solar incidente (Wm^{-2});

R_b = fator de inclinação do coletor (0,8; adimensional);

Q_a = energia elétrica auxiliar por unidade de tempo (Wh).

A área do coletor foi calculada conforme Equação (06):

$$A_c = N \times D \times L \quad (06)$$

onde:

A_c = área do coletor (m^2)

N = número de tubos do coletor (20)

D = diâmetro do tubo interno ($47 \times 10^{-3} \text{ m}$)

L = comprimento da superfície absorvedora do tubo interno (1,713 m)

3.5.2. Cálculo do balanço energético do sistema

Com a Equação (07) foi calculado o balanço energético do sistema. Nela, a energia para a variação da temperatura da água do sistema se deve à incidência da

radiação solar no coletor e ao calor gerado pela resistência elétrica auxiliar, descontadas as perdas devidas à transferência de calor através da parede do *boiler* e à reposição de água fria no tanque de reposição (DUFFIE E BECKMAN, 2006).

$$m \times C_p \times (T_s^+ - T_s^-) = Q_s \times \Delta t + Q_a \times \Delta t - (UA)_s \times \Delta t \times (T_s^- - T_a) - m_c \times C_p \times (T_c - T_f) \quad (7)$$

onde:

m_c = massa de água de consumo (kg);

T_s^+ = temperatura no instante posterior (°C);

T_s^- = temperatura no instante anterior (°C);

T_a = temperatura ambiente (°C);

T_c = temperatura da água de consumo (°C);

T_f = temperatura água fria (°C);

Δt = intervalo de tempo considerado na simulação (h);

Q_s = energia solar transmitida ao fluido por unidade de tempo (Wh);

Q_a = energia elétrica transmitida ao fluido (Wh);

U = coeficiente global de transferência de calor entre reservatório e o ar ($Wm^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$);

A = a área externa do reservatório térmico (m^2)

O termo Q_s expressa a energia térmica útil produzida no coletor, ou seja, é a diferença entre a radiação solar absorvida e as perdas térmicas pelo coletor, podendo ser escrito da seguinte forma:

$$Q_s = A_c \times F_R \times [S - U_L(T_{pm} - T_a)] \quad (08)$$

onde:

F_R = fator de remoção do calor do coletor solar (adimensional);

S = radiação solar incidente (Wm^{-2});

U_L = coeficiente global de transferência de calor entre o coletor e o ar ($Wm^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$);

T_{pm} = temperatura da superfície absorvedora do coletor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Eficiência do aquecedor solar analisado

A eficiência do coletor solar foi calculada com a Equação (3), resultando no valor médio de 51%. Goerck (2008) avaliou um aquecedor solar de água com coletor de tubos a vácuo com *heat pipe* na região de Taquari (RS), estimando a sua eficiência em 43%.

4.2 Fator de Remoção do coletor (F_R) e Coeficiente Térmico do boiler (U)

Os fatores U_A e F_R foram determinados a partir da Equação (07) utilizando-se simulações no programa Matlab 2012.

O valor ótimo obtido para o F_R (fator de remoção do coletor) foi de 0,62, com valores variando entre 0,50 a 1,0 em incrementos de 0,01 no programa.

Para U_A (produto do coeficiente térmico do boiler pela sua área externa), o valor ótimo foi de 3,5 (com valores variando de 2 a 10 em incrementos de 0,5). SABS (2009) obteve o coeficiente de 3,878 para reservatórios expostos à intempérie.

Os valores ótimos obtidos foram os que apresentaram melhor ajuste dos dados medidos de temperatura e de radiação solar à equação de balanço energético.

4.3. Avaliação do funcionamento do aquecedor nos 90 dias do experimento.

A Tabela 1 compara o desempenho e consumo de energia do aquecedor nos três cenários avaliados.

A terceira coluna da tabela relaciona os dias em que a temperatura da água aquecida no interior do boiler ficou acima de 40 °C (no horário dos banhos).

Tabela 1: Comparativo de consumo de energia elétrica entre os três cenários analisados

Cenário de funcionamento do aquecimento auxiliar	Total (dias)	Temperatura do boiler acima de 40°C (dias)	Consumo medido (kWh)	Média diária (kWh)
Cenário 1	46	46	436	9,48
Cenário 2	15	15	38,9	2,59
Cenário 3	28	14	0	0

No Cenário 1 a resistência foi energizada independente da hora do dia, mantendo a temperatura da água sempre acima de 40°C. O consumo de energia elétrica medido nos 46 dias foi de 436 kWh (média de 9,48 kWh.dia⁻¹).

Nos dias em que o aquecedor operou no Cenário 2, ou seja, nos dias em que o timer impediu o funcionamento desta resistência antes das 12 horas, a temperatura do boiler também ficou acima dos 40°C no final da tarde, atingindo, portanto, a temperatura mínima fixada para os banhos. O consumo medido de energia elétrica foi de 38,9 kWh (média de 2,59 kWh.dia⁻¹).

Nota-se que a inserção do timer no circuito para limitar o funcionamento da resistência reduziu em 72,68% o consumo médio diário em relação aos dias do Cenário 1. Isto ocorreu porque o timer impediu o funcionamento desnecessário da resistência no início da manhã, quando geralmente a temperatura da água no interior do boiler caía abaixo dos 40°C.

No Cenário 3 são os dias em que foi utilizada apenas a radiação solar como fonte de energia. Nestes dias, o timer foi configurado como “Desligado” desde o final da tarde de um dia até o final da tarde do dia seguinte, bloqueando a energização da resistência auxiliar.

Neste modo de operação, em 14 dias (de um total de 28), a temperatura do boiler às 17 horas foi inferior à temperatura fixada, considerando-se, portanto, ineficaz a utilização deste aquecedor sem um sistema de aquecimento auxiliar.

4.4. Análise do uso do coletor solar como pré aquecedor para um chuveiro elétrico

Considerando-se os resultados obtidos no Cenário 3, foi elaborada a Tabela 2. Ela compara a energia que seria consumida por um chuveiro eletrônico para aquecer a água até a temperatura desejada para os banhos, a partir da temperatura fria e da água pré-aquecida pelo aquecedor solar.

A primeira coluna da tabela relaciona os 14 dias do Cenário 3 nos quais a temperatura da água de consumo ficou abaixo dos 40°C no horário de banho.

Tabela 2: Consumo diário de energia elétrica para aquecimento de água para banho a partir da entrada de água fria e da saída de água quente do boiler

Dias do Cenário 3 com temperaturas aquém do desejado	Temperatura da água (°C)		Complemento de energia (kWh)	
	Pré- aquecida	Fria	Com água pré-aquecida	Com água fria
11/06/2012	37,78	21,96	0,31	2,51
20/06/2012	33,55	20,55	0,90	2,71
05/07/2012	37,27	22,17	0,38	2,48
08/07/2012	37,50	16,65	0,35	3,25
10/07/2012	30,29	18,59	1,35	2,98
13/07/2012	36,14	16,13	0,54	3,33
17/07/2012	18,89	16,62	2,94	3,26
20/07/2012	37,60	15,27	0,33	3,45
23/07/2012	29,70	20,88	1,43	2,66
26/07/2012	23,96	22,00	2,24	2,51
29/07/2012	27,70	23,01	1,71	2,37
01/08/2012	35,83	20,77	0,58	2,68
16/08/2012	36,52	23,42	0,49	2,31
28/08/2012	25,96	19,31	1,96	2,88
Total (kWh)			15,51	39,38
Média diária (kWh)			1,11	2,81

Os resultados da quarta e da quinta coluna foram calculados com a Equação (2), considerando a massa igual a 120 kg de água a 40 °C (2 banhos).

Na quarta coluna estão os valores calculados para complemento de energia térmica necessária para atingir a temperatura fixada de consumo a partir da temperatura da água pré aquecida por energia solar, constante na segunda coluna. Esta energia poderia ser suprida por um chuveiro eletrônico com potência variável, que consumiria uma média diária de 1,11 kWh.

A última coluna mostra os valores calculados da energia que seria consumida nos mesmos dias por um chuveiro, também eletrônico, para elevar a temperatura da água fria até 40°C. O consumo médio diário de 2,81 kWh do chuveiro seria, neste caso, cerca de 1,5 vezes o consumo utilizando a água pré aquecida com energia solar.

Das quatro formas de operação do aquecedor solar analisadas (três cenários de controle da resistência auxiliar e uma simulação do sistema de aquecimento solar acoplado a um chuveiro eletrônico), esta última é a que atenderia às condições de banho todos os dias, com o menor consumo de energia elétrica.

4.5. Economia anual do uso conjunto do chuveiro eletrônico com aquecedor solar

A Tabela 3 mostra uma simulação da economia anual obtida quando da utilização de um chuveiro eletrônico de potência variável para aquecer a água de uma temperatura inicial (fria ou pré-aquecida pelo aquecedor solar) até a temperatura desejada para o banho (em torno de 40°C).

Tabela 3: Determinação da economia obtida usando água pré aquecida com energia solar para alimentar um chuveiro eletrônico

Mês	Radiação média diária (Wh.m ⁻² .dia ⁻¹)	Temp.da água pré aquecida (°C)	Energia consumida pelo chuveiro para complementar a temperatura desejada (kWh)	Temp.média da água fria (° C)	Energia consumida pelo chuveiro para a água fria atingir a temperatura desejada (kWh)
jan	5556	52	0	19	90,84
fev	5000	48	0	19	82,05
mar	5000	47	0	18	95,16
abr	3333	37	14,62	17	96,28
mai	3333	33	31,90	13	116,79
jun	2778	28	50,34	12	117,21
jul	2778	28	50,34	12	121,12
ago	3333	33	31,90	13	116,79
set	3889	37	13,46	14	108,84
out	4444	42	0	16	103,81
nov	5556	50	0	17	96,28
dez	6111	54	0	18	95,16
Consumo anual(kWh)			192,55		1.240,34
Custo anual (R\$)			88,57		570,55
Economia anual (R\$)			481,98		

A simulação demonstrada na Tabela 3 indica uma economia anual de R\$ 481,98, obtida pela redução do consumo de energia elétrica de um chuveiro alimentado com água pré aquecida por energia solar (custo anual de R\$ 88,57), quando comparado com o chuveiro alimentado com água fria da rede de abastecimento (custo anual de R\$ 570,55).

Foi considerado o custo de R\$ 0,45975 o kWh de energia elétrica, válido para o consumidor enquadrado na categoria B1-residencial (COPEL, 2012).

A temperatura da água pré aquecida, na terceira coluna da tabela, foi estimada com base no potencial de aquecimento do coletor solar quando exposto às médias mensais de radiação no Oeste do Paraná (PEREIRA, 2006). Desta forma, esta temperatura foi calculada mês a mês a partir da Equação (2), sendo a energia solar disponível (Q) para cada mês igual ao produto da radiação solar pela área do coletor e pelo rendimento do aquecedor, obtido em 4.1.

Os valores de complemento de energia, na quarta coluna, são os de energia térmica necessária para a água, já pré aquecida pelo coletor solar, atingir 40° C. Há uma necessidade maior de complemento de energia elétrica entre maio e agosto, pois nestes meses coincidem os menores valores de temperatura ambiente e de radiação solar. Já no mês de abril, a menor radiação é compensada por temperaturas ambientes maiores, enquanto em setembro ocorre o oposto.

A tabela foi elaborada levando-se em conta que as residências geralmente dispõem de caixa d'água, onde a água permanece armazenada à temperatura ambiente. Portanto, a temperatura da água fria constante na quinta coluna foi considerada igual à temperatura ambiente na situação mais adversa, ou seja, igual à média mensal das temperaturas mais baixas registrada na cidade de Cascavel entre 1972 e 2009 (Lima, 2012).

Os valores da última coluna representam a energia necessária a um chuveiro para atingir a temperatura fixada para o banho, quando alimentado com água da caixa de água.

4.6. Análise econômica de investimento em um sistema de aquecimento de água para banho.

Na análise econômica de investimento feita a seguir, foram consideradas cinco opções de aquecimento de água para banho, denominadas:

- a) Cenário 1: Aquecedor solar com resistência interna operando sem limitação de horário;
- b) Cenário 2: Aquecedor solar com resistência interna operando apenas das 12 às 18 horas;
- c) Cenário 3: Aquecedor solar operando sem resistência auxiliar;
- d) Simulação 1: Aquecedor solar utilizando um chuveiro eletrônico como resistência auxiliar; e

e) Simulação 2: Apenas chuveiro eletrônico.

A Tabela 4 resume os resultados para estas cinco opções.

Tabela 4: Análise econômica de investimento em cinco opções para aquecimento de água para banho

Opções	Consumo anual de energia elétrica (kWh)	Custo anual da energia elétrica (R\$)	Custo inicial dos equip. (R\$)	Custo inicial anualizado (R\$)	Custo total anualizado (R\$)	Pay back comparado c/ Simul. 2 (anos)	Atende à exigência de água quente?
Cenário 1	2412,50	1.109,15	2739,00	282,02	1.391,16	(NA)	Sim
Cenário 2	238,28	109,55	2739,00	282,02	391,56	7,23	Sim
Cenário 3	0,00	0,00	2739,00	282,02	282,02	5,59	Não
Simul. 1	192,55	88,53	2839,00	292,31	380,84	7,16	Sim
Simul. 2	1240,34	570,24	100,00	10,30	580,54	(Refer.)	Sim

(NA) = Não aplicável pois o tempo de retorno resulta negativo.

Analisando a Tabela (04), verifica-se que a opção “Cenário 1” tem o maior custo anual (R\$ 1391,16), seguida pela opção “Simulação 2” (R\$ 580,54).

A opção “Cenário 3” tem o menor custo anual, porém não atende à exigência de temperatura da água nos meses mais frios.

As opções “Cenário 2” e “Simulação 1” praticamente se equivalem.

A coluna 4 mostra o tempo de retorno do investimento, calculado pelo método de *payback* descontado, obtido pela Equação (09) (Newnan, 2011).

$$n = \frac{\ln\left(\frac{U}{U - P \cdot i}\right)}{\ln(1 + i)} \quad (09)$$

onde:

n = período de pagamento (anos);

U = retorno líquido anual do investimento (R\$);

i = taxa anual de juros (%).

Nos cálculos foram considerados os dados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Dados de entrada da avaliação econômica de investimento

Custo de aquisição do aquecedor solar analisado (R\$)	2 339,00
Custo de materiais e mão de obra para instalação do aquecedor (R\$)	400,00
Custo de aquisição do chuveiro eletrônico (R\$)	100,00
Custo do kWh (categoria B1 – convencional) (R\$)	0,45975
Vida útil do aquecedor considerado (anos)	15 anos
Taxa anual de juros (%)	6,00

5. CONCLUSÕES

Os dados obtidos com a realização deste experimento permitiram calcular a eficiência média de 51% para o modelo de aquecedor solar analisado. Com a equação de balanço energético foi encontrado o valor de 0,62 para F_R (fator de remoção do coletor) e de 3,5 para UA (produto do coeficiente térmico do boiler pela sua área externa), valores compatíveis com os encontrados na literatura (SABS, 2009).

A média diária do consumo de energia elétrica foi de 9,48 kWh com a resistência auxiliar ligando sem restrição de horário (Cenário 1). Já com seu horário de funcionamento restrito à tarde (Cenário 2), o consumo médio diário foi de 2,59 kWh ou seja, 72,68% menor.

Em 14 dos 28 dias que o aquecedor funcionou no Cenário 3, com a resistência auxiliar desligada, a temperatura da água no final da tarde foi inferior à fixada, o que inviabiliza esta forma de operação.

Simulando-se a energia que seria necessária para um chuveiro eletrônico complementar a temperatura da água nestes 14 dias do Cenário 3 (Simulação 1), obteve-se um consumo médio diário de 1,11 kWh contra 2,81kWh, que seriam consumidos pelo mesmo chuveiro, se fosse alimentado com água fria da rede.

Os custos anualizados destas quatro formas de operação foram calculados e comparados com os de um chuveiro eletrônico alimentado com água fria da rede. Esta análise econômica revelou que as opções “Cenário 2” e “Simulação 1” praticamente se equivalem (R\$ 391,56 e R\$ 380,84, respectivamente), mas a última seria bem mais interessante pela flexibilidade nos horários de utilização de água quente. Finalmente, obteve-se que o retorno do investimento na instalação de um aquecedor solar complementado por um chuveiro eletrônico, considerando juros de 6% a.a., ocorra em cerca de 7 anos, quando comparado com o chuveiro elétrico usado de forma isolada.

Para futuros trabalhos, ficam as seguintes sugestões:

- Avaliar o rendimento do aquecedor alterando sua inclinação para 34 graus (latitude local mais 10 graus) e com o reservatório térmico abrigado das intempéries;
- Avaliar a variação do rendimento do coletor com tubos sujos;
- Avaliar a queda de rendimento do aquecedor com pequeno vazamento na tubulação de água de consumo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. NBR 5410- **Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro, 2004.
- ABRAVA. **O mercado elege o Sol**. Disponível em <http://www.abrava.com.br/?Canal=8&Channel=Tm90JiMyMzc7Y2lhcw==&OperId=3937>. Acesso em 16/07/2012
- ALDABÓ, R. **Energia Solar**. São Paulo. Artiliber Editora, 2002.
- ANEEL. **Atlas de energia elétrica no Brasil**. 3ª ed. Brasília 236 p. 2008.
- BAPTISTA, A. S. C. **Análise da viabilidade econômica da utilização de aquecedores solares de água em resorts no nordeste do Brasil**. Rio de Janeiro. Universidade Federal Do Rio De Janeiro. 2006. Dissertação de Mestrado de Ciências em Planejamento Energético, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal Do Rio De Janeiro.
- BUDIHardjo, I.; Morrison, G. L. Performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters. Sidney, Austrália. **Solar Energy**, vol.83, p. 49-56. 2009.
- COPEL. **Taxas e tarifas**. Disponível em [.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Ftarifas%2Fpagcopel2.nsf%2Fverdocatual%2F23BF37E67261209C03257488005939EB](http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Ftarifas%2Fpagcopel2.nsf%2Fverdocatual%2F23BF37E67261209C03257488005939EB), 2012. Acesso em 22 nov. 2012.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. 3ª ed. New Jersey. Wiley, 2006. 928 p.
- ENVIRO FRIENDLY. Disponível em <http://www.enviro-friendly.com/evacuated-tube-solar-hot-water.shtml>. Acesso em julho de 2012.
- EXXA SOLAR. **Sistema de aquecimento solar - tubos à vácuo**. Manual de Instalação. 2009.
- GIMENES, A.L.V, SILVESTRE, W.P. UDAETA, M.E.M. Viabilidade da execução de projeto de eficiência energética com uso de energias renováveis mediante implantação de equipamento híbrido fotovoltaico e térmico para geração de eletricidade e aquecimento de água com energia solar para substituição de chuveiros elétricos. In. Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica, 21. 2011, Florianópolis. **Revista XXI SNPTEE**. Florianópolis. vol. 2 Fevereiro | 2011.p.43.
- GOERCK, M. **Determinação do potencial energético de um coletor solar foto térmico na região do vale do Taquari – RS Brasil**. Lajeado. Centro Universitário Univates. 2008. 92p. Dissertação (Mestrado em Ambiente e Desenvolvimento) –
- GOY, Leonardo. Casa Civil corrige: PAC 2 prevê R\$ 1,088 tri em energia. Isto é dinheiro. [S.l.] 29 mar 2010. **Economia on line**. Disponível em http://www.istoedinheiro.com.br/noticias/18144_CASA+CIVIL+CORRIGE+PAC+2+P REVE+R+1088+TRI+EM+ENERGIA. Acesso em 03 jan. 2013.

HASAN, A. Thermosyphon solar water heaters: effect of storage tank volume and configuration on efficiency. **Energy Convers. Mgmt** Vol. 38. No. 9. pp. 847-854, 1997

INMETRO - Instituto Nacional De Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Regulamento de avaliação da conformidade de sistemas e equipamentos para aquecimento solar de água**. Anexo da portaria INMETRO nº 395 / 2008. 2008.

LIANG R. et al. Theoretical and experimental investigation of filled-type evacuated tube solar collector with U tube. Dalian, China. **Solar Energy**. Vol. 85, p. 1735-1744. 2011.

LIANG R. et al Performance analysis of a new-design filled-type solar collector with double U-tubes **Energy and Buildings**. Vol. 57, p. 220–226. Fev. 2013,

LIANGDONG Ma.et al. Thermal performance analysis of the glass evacuated tube solar collector with U-tube. Dalian, China. **Building and Environment**. Vol. 45, p. 1959-1967. 2010.

LIMA, C.B. Análise da variação das temperaturas mínimas para Cascavel – PR. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, vol. 1, p. 1-21, 2012.

MANEA, T. F. et al. **Determinação de parâmetros de desempenho para coletores solares tubulares a vácuo**. LABSOL – Laboratório de energia solar – PROMEC – UFRGS. 2011.

MOGAWER, T.; SOUZA, T. M. Sistema Solar de Aquecimento de Água para Residências Populares. In. **Encontro de Energia do Meio Rural**, 5. 2004, Campinas. Anais eletrônicos. Disponível em <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC000000022004000200050&script=sci_arttext&tlng=pt>. Acesso em 3 jan. 2013.

NAGARAJU, J.; GARUD S. S.; KUMAR K. A.; RAO M. R. 1 MWth Industrial solar hot water system and its performance. **Solar Energy**. [S.l.], vol.66, no. 6, p.491-497. Set. 1999.

NASPOLINI, H. F.; Rütger, R. Assessing technical and economic viability of low cost domestic solar hot water systems (DSHWS) in low income residential dwellings in Brazil. **Renewable Energy**. 2012, vol. 48, p 92-99

NASPOLINI, H. F.; MILITÃO, H. S. G.; RÜTER, R. The role and benefits of solar water heating in the energy demands of low-income dwellings in Brazil. **Energy Conversion and Management**, .vol. 51, ed. 12, dez. 2010, p. 2835–2845.

NEWHOME. **Coletores tubulares a vácuo**. Disponível em <http://www.newhome.com.br/HTMLs/Ekohome/Solar/T%C3%A9rmico/ColetorTubVac.htm>. Acesso em julho de 2012.

NEWNAN, D.; Eschenbach, T.; Lavelle, J. **Engineering Economics Analysis**. 11ª edição. Oxford University Press, 2011.

NICHITA, G. Nova lei torna aquecimento solar obrigatório em SP. **Revista Sustentabilidade**, jul./2007. Disponível em <<http://www.revista.sustentabilidade.com.br/noticias/nova-lei-torna-Aquecimento-solar-obrigatorio-em-sp>>, acesso em maio/2012.

NORTON, B. Anatomy of a solar collector. **Refocus**, vol. 7, ed.3, p. 32-35. 2006.

OLIVEIRA JR., C. J. **Controle eletrônico de potência em aquecedores elétricos de passagem por semiciclos otimizados**. São Paulo. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica de São Paulo. 2006.

PENEREIRO, J. C.; Melo, L. P.; Coradi T. B. Construção de um aquecedor solar de baixo custo sem cobertura: análise experimental da eficiência térmica para vários ensaios. **Revista de ciência & tecnologia**. Nova Iguaçu - Rio de Janeiro. v.10 n. 1 (Jun-2010). Gráfica Universitária, 2010.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F.R.; ABREU, S. L.; RUTHER, R. V. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 1ª. ed. São José dos Campos. INPE, 2006.

PRADO, R.T.A. et al. **Levantamento do estado da arte: Energia solar. Projeto tecnologias para construção habitacional mais sustentável**. São Paulo Projeto FINEP 2386/04. 2007.

PEREIRA, A. B. et al. Estimativa da radiação solar global diária em função do potencial de energia solar na superfície do solo. **Scientia Agricola**, v.59, n.2, p.211-216, abr./jun. 2002

REDPATH, D. A. G ET al. Experimental investigation of fluid flow regime in thermosyphon heat-pipe evacuated tube solar heat heaters. Dublin. **Conference on Passive and Low Energy Architecture**, 22. 2008.

RUAS, R. A. A. et al. Análise energética de um protótipo de aquecedor solar de baixo custo. **Global Science and Technology**. Vol. 02, n. 2, p. 01-07. Mai/agos.2009.

SABS Commercial (Pty) Ltd. **Test report SANS 6211-1:2003**. Pretória.2009. Disponível em <http://kayema.co.za/sitefiles/wp-content/uploads/2010/01/Kayema-SANS-6211-1-Report-09S001b-Kayema-200lt-indirect-system.pdf><http://kayema.co.za/sitefiles/wp-content/uploads/2010/01/Kayema-SANS-6211-1-Report-09S001b-Kayema-200lt-indirect-system.pdf>. Acesso em 16 jan. 2013.

SAVIKCI, D. L.; VIELMO, H. A.; KRENZINGER, A. Three dimensional analysis and investigation of the thermal and hydrodynamic behaviors of cylindrical storage tanks. [S.l.]: **Renewable Energy**, vol. 36(5), p.p. 1364-1373. 2011.

SIQUEIRA, D. A. **Estudo do desempenho de um aquecedor solar de baixo custo. Uberlândia**. Dissertação de mestrado Universidade Federal de Uberlândia. 2009.

SIQUEIRA, A. M. **Desenvolvimento de um programa de simulação computacional de sistemas de aquecimento solar para água.** Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande Do Sul. Porto Alegre, 2003.

WOELZ, A. T. Aquecedor solar de baixo custo (ASBC): uma alternativa custo-efetiva.. In: **Encontro de energia no meio rural, 4.** 2002, Campinas. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022002000100019&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 03 Jan. 2013.